

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(89).15009

М. В. КИДРАЧУК¹, А. О. КОРНІЄНКО¹, С. В. ФЕДОРЧУК¹, Н. О. РИБАСОВА¹,
А. Л. ГЛОВИН²

¹Національний авіаційний університет, Київ

²ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ, СТРУКТУРИ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ З РІЗНИМ РОЗМІРОМ НАПОВНЮВАЧА

Проведено дослідження напружено-деформованого стану композиційних покриттів з різним розміром наповнювача навантажених силами тертя. Показано, що розподіл напружень та їх розмір має значний вплив на їх зносостійкість. Установлено оптимальний відносно зносостійкості об'ємний вміст зміцнювальної фази, який становить 25...40 %, що зумовлено співвідношеннями фізико-механічних властивостей наповнювача і матриці. Також проведені дослідження композиційних покриттів, що містять декілька шарів з різним вмістом та розміром наповнювача. Установлено, що створення багатошарових композицій має позитивний вплив на зносостійкість таких покриттів.

Ключові слова: композиційні покриття, багатошарові композиції, напруження, тертя, знос.

Сутність проблеми та її зв'язок з практичними завданнями. Досвід експлуатації і результати численних досліджень свідчать про те, що в більшості випадків функціональні властивості і ресурс різних видів машин та обладнання визначаються інтенсивним зношуванням важконавантажених деталей вузлів тертя і робочих органів. Водночас традиційні методи нанесення покриттів не задовольняють постійно зростаючі вимоги до них у процесі експлуатації відповідальних вузлів тертя механізмів в умовах динамічних навантажень, температур, активного впливу корозійних середовищ і наявності абразивних потоків.

Ефективний вихід із ситуації, що склалася, – це формування на поверхні виробів із конструкційних матеріалів зносостійких градієнтних нашарувань (ГН) із гетерогенним складом, шаруватою або дискретною структурою матрично-наповненого або скелетного типу.

Особливість градієнтних композиційних покриттів полягає в тому, що саме покриття є порошковою формовкою або для його отримання використовуються порошкові середовища – джерело елементів чи сполук, які утворюють покриття. Так, газотермічні покриття (ГТП) – це порошковий псевдосплав частинок порошку, який напилюється; композиційні електролітичні покриття (КЕП) – механічна суміш, яка складається з металевої матриці і порошкового наповнювача; евтектичні покриття (ЕП) – порошкова формовка скелетного типу у вигляді опаленого в результаті термічної обробки зміцнювального або відновлювального порошкового шару на поверхні, яку захищають.

Незважаючи на велику кількість відомостей про окремі проблеми, що стосуються одержаних ГТП, КЕП, ЕП, на сьогодні немає систематизованих відомостей про комбінований метод отримання ГН. Щодо триботехнічних і трибометричних характеристик багатошарових покриттів з різним градієнтом нашарувань, сформованих, зокрема, твердими вкрапленнями з різними розмірами та їх різним об'ємним вмістом, то їх недостатньо для узагальнення, або вони отримані з використанням окремих здебільшого непридатних для зіставлення, методик.

Тому на часі і актуальна потреба в дослідженні та систематизації триботехнічних характеристик КЕП на нікелевій основі, які вміщують як зміцнювальну фазу карбіди, нітриди і бориди (TiC , SiC , TiN , CrB_2 , TiB_2). Власне, завдяки структурним відмінностям композиційних нашарувань вони забезпечують оброблюваній поверхні потрібні властивості, зазвичай, різко відмінні щодо структурного градієнта від властивостей матеріалу матриці або наповнювача самого покриття, а також основи, на яку воно наноситься.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Градієнтні нашарування – це композиційні матрично-наповнені або армовані покриття, регулярний характер структури яких порушено в напрямі градієнта (наявні перепади концентрацій елементів у матричному сплаві, між матрицею і вкрапленнями, або форма, кількість і розміри самих вкраплень та відстань між ними змінюються за певним законом).

Градієнтні покриття можна змоделювати сукупністю одношарових композиційних нашарувань з різним законом зміни градієнта. Неоднорідність структури багатошарових покриттів спричиняє цілий спектр нових дослідницьких завдань, які не виникають під час вивчення трибоповедінки традиційних матеріалів, і меншою мірою одношарових композицій. До таких завдань, зокрема, слід віднести і проблему визначення раціонального градієнта властивостей та триботричних характеристик покриттів.

Одношарові покриття матрично-наповненого або скелетного типу суттєво поліпшують працездатність вузлів тертя машин і механізмів [1–3]. Аналіз антифрикційних властивостей композиційних матеріалів показав, що розмір вкраплень наповнювача та його об'ємний вміст відіграють важливу роль [4; 5]. На зносостійкість гетерогенних матеріалів суттєвий вплив справляє напружений стан, що виникає в процесі контактування зі спряженою поверхнею [6].

У праці [7] наведено результати розрахункового визначення напружено-деформованого стану композиційних матеріалів з однаково орієнтованими стовпчастими утвореннями. Установлено взаємозв'язок між концентрацією напружень, співвідношенням механічних властивостей матриці і вкраплень, щільністю розташування вкраплень. У структурі матеріалу визначено області з підвищеним рівнем напружень як найбільш схильні до зародження руйнівальних процесів. Завдання про еволюцію структури та механічних властивостей композиційних покриттів у результаті пластичної деформації поверхневих шарів під час тертя розглянуто в праці [8]. Якщо в процесі тертя структура покриття змінюється таким чином, що реалізується правило позитивного градієнта властивостей, відбувається нормальне зовнішнє тертя. Це дає змогу впливати на параметри пари тертя, а також на властивості нанесених шарів, використовуючи як засоби керування механізмами зношування відомі дані про визначення механічних і міцнісних властивостей. На моделі композиційного матеріалу, в якому між наповнювачем і матрицею є кільцева перехідна зона з відомим законом зміни цих механічних властивостей, досліджено характер напруженого стану, що виникає в умовах навантаження силами тертя ковзанням [9; 10]. Показано, що локальні напруження в композиції залежно від виду навантаження силами тертя елементарного об'єму можуть бути прогнозовані й розраховані, зважаючи на механічні властивості, вигляд і структуру перехідної зони, яка утворюється в результаті дифузійної взаємодії матриці і вкраплення, що передбачено діаграмою стану.

Отже, здобуті на сьогодні теоретичні й експериментальні дані, пов'язані з вивченням композиційних покриттів, у поєднанні із знанням механізму їх формування, – важлива передумова формування композиційних нашарувань, проте недостатня. Тому метою роботи є дослідження впливу структури і складу композицій матрично-наповненого типу та градієнта властивостей на триботехнічні властивості одно- та багатошарових покриттів.

Методика досліджень. Композиційні електролітичні покриття одержували зарощуванням електролітичним нікелем порошків зміцнювальної фази SiC різної дисперсності. Покриття наносили на призматичні зразки розміром $10 \times 10 \times 5$ мм. Нашарування, що містять великі частинки (фракції 100/80, 50/40, 28/10 мкм) осаджували на горизонтальному катоді імпульсним переміщенням електроліту і за густини струму $5 \dots 10$ А/дм², рН 3-4, за температури електроліту 25 і 40 °С. Покриття, що містять більш дисперсні частинки (фракція 5/3 мкм, наночастинки SiC_N ~ 50 нм) одержували на вертикальному катоді з постійним переміщенням електроліту і за густини струму $4 \dots 5$ А/дм². Багатошарові покриття отримували послідовним пошаровим осадженням осадів, що містять різну кількість наповнювача різної дисперсності.

Випробування зразків з покриттями проводили на установці М-22М в умовах сухого тертя за швидкості ковзання $V = 0,5$ м/с і навантажень Р 20; 40; 60 Н. Контртілом слугувала загартована сталь 45(HRC 45). Схема спряження: вал – площа. Шлях тертя $L = 1$ км. Величину зносу оцінювали за втратою маси зразка і величиною лінійного зносу пари тертя.

Результати й обговорення. Досліджували композиції з різними розмірами і об'ємним умістом вкраплень. Уміст вкраплень карбиду кремнію в покритті залежить від їх розмірів. Результати хімічного аналізу КЕП з різними фракціями вкраплень наведено в табл. 1. Проте, змінюючи співвідношення перемішування і седиментації, кількість вкраплень у покритті легко регулювати об'ємним умістом від 0 до 50...70 %.

Таблиця 1

Вплив розмірів частинок SiC на їх уміст у КЕП

Розмір вкраплень, мкм	Об'ємний уміст частинок в покритті, %
50 нм	3,8
5/3	8,66
28/20	24,66
50/40	37,50
100/80	43,11

Триботехнічні дослідження показали, що найвищою зносостійкістю характеризуються КЕП із вкрапленнями 28/20 за їх об'ємним умістом в покритті 24 %. Результати досліджень таких покриттів з різним умістом наповнювача свідчать, що оптимальними щодо зносостійкості є композиції, об'ємний уміст вкраплень яких 20...40 %. Такі ж результати були отримані для КЕП Ni-TiB₂ у праці [5]. Проте оптимальний склад сплавів, що характеризувались максимальною зносостійкістю, становив 20...30 % вкраплень.

На сьогодні немає пояснень таких закономірностей з єдиних позицій, не з'ясовано, який з параметрів – об'ємна частка, розмір вкраплень, найменша відс-

тань між ними – визначають ті чи інші трибометричні параметри, механічні та триботехнічні властивості.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що для оптимальних складів композицій (20...30 %, розмір частинок 28/20) спостерігається закономірність – відношення відстаней між центрами вкраплень L до їх розмірів d становить близько 3. Так, за об'ємного вмісту 24 % відстань між центрами вкраплень становить 90 мкм відповідно $L/d = 3,21$.

Оскільки серед отриманих покриттів оптимальний вміст мали тільки покриття з частинками розміром 28 мкм, то досліджувалися додатково композиції інших фракцій наповнювача з різним об'ємним умістом. За результатами триботехнічних досліджень найбільшою зносостійкістю характеризуються КЕП з об'ємним умістом наповнювача близько 24 %. Результати триботехнічних досліджень КЕП із вкрапленнями різних фракцій однакового об'ємного вмісту близько 24 % показано на рис. 1. При цьому найбільшою зносостійкістю характеризуються КЕП із вкрапленнями розміром 30...50 мкм. Характерно, що для вкраплень різних розмірів за об'ємного вмісту близько 24 % відношення міжцентрових відстаней до діаметрів становить близько 3 (рис. 2).

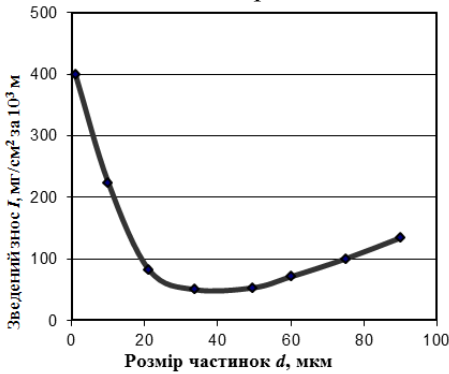


Рис. 1. Залежність зносостійкості КЕП Ni-SiC від розміру частинок SiC при навантаженні 20 Н, швидкості тертя 0,5 м/с (об'ємний вміст наповнювача 24%)

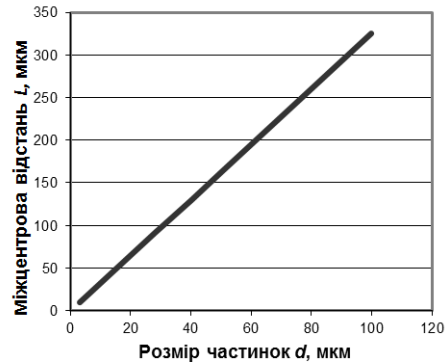


Рис. 2. Залежність відстані між центрами частинок від їх розміру за об'ємного вмісту 24%

Ці результати узгоджуються з висновками роботи [11], у якій поляризаційно-оптичним методом досліджено вплив структурного стану композиції на її напружено-деформований стан і зносостійкість. У результаті дослідження факторів, що визначають розміщення зон максимальних дотичних напружень в композиційному матеріалі, встановлено умови оптимізації їх розподілу, що забезпечують максимальний опір утомному зношуванню, і дано кількісну оцінку відношенню відстані між центрами вкраплень до їх розміру $L/d \geq 3,3$, за якого реалізуються ці умови.

Оскільки основна роль твердих частинок полягає у зміцненні матриці, то наявність жорстких вкраплень зміцнює, або армує, матрицю, обмежуючи її пластичну течію. Напевно за такого співвідношення ($L/d \geq 3,3$) частинки найбільш ефективно стискають матрицю і обмежують її пластичну деформацію. При цьому зона підвищених дотичних напружень, що виникає в результаті взаємодії полів напружень від сусідніх вкраплень, заглиблюється в матеріал нижче вкраплень. Це, в свою чергу, знижує навантаження на матрицю між вкрапленнями і забезпечує позитивний градієнт напружень від поверхні тертя. Якщо міжцент-

рові відстані менші, то внаслідок утворення тріщин на ослаблених границях розділу частинка – частинка міцність композиції зменшується.

Якісно прогнозувати напруження початку пластичних деформацій $\langle \sigma_1 \rangle$ композиційного матеріалу в процесі тертя залежно від природи, об'ємного співвідношення компонентів композиції і коефіцієнта тертя f відповідно до аналітичних досліджень напружено-деформованого стану [8] можна, скориставшись формулою

$$\langle \sigma_1 \rangle = \frac{\sqrt{2}(\sigma_T)_m}{\sqrt{A + f^2 B}},$$

де $(\sigma_T)_m$ – границя текучості матеріалу матриці; f – коефіцієнт перетворення під час тертя нормальних зусиль у тангенціальні, який з деякими допущеннями можна вважати коефіцієнтом тертя; A , B – коефіцієнти, що залежать від механічних характеристик і об'ємного вмісту компонентів.

Відносне мінімальне значення середнього напруження поздовжнього стиску $\langle \sigma_1 \rangle / \langle \sigma_T \rangle_m$, за якого в матеріалі починається процес пластичної деформації, можна брати за коефіцієнт пластичного стискання, який слугує мірою ступеня зміцнення. Показано, що за об'ємного вмісту наповнювача $\xi < 10\%$ зміцнення не суттєве і $\langle \sigma_1 \rangle / \langle \sigma_T \rangle_m$ наближується до одиниці. За більш щільного розташування $20 < \xi < 40\%$ пластична деформація значно обмежується. При цьому, якщо $f > 0,3$, збільшення об'ємного вмісту зміцнювальної фази до 40% не ефективне, оскільки не впливає на середні нормальні напруження початку пластичної деформації. Крім того, внаслідок зменшення відстані між частинками ($\xi > 40\%$) відбувається значне локальне зміцнення матриці, що призводить до зниження міцності через утворення тріщин на ослаблених ділянках матриці між частинками.

Слід зазначити, що на діапазон об'ємного вмісту наповнювача, який забезпечує найвищу зносостійкість композиції, впливають фізико-механічні характеристики матриці і наповнювача. Так, для системи Ni–TiB₂ працездатність КЕП забезпечується, якщо об'ємний вміст наповнювача 20...30%, тоді як для системи Ni–SiC (20...40%) це, напевно, пов'язано із співвідношеннями механічних властивостей матриці і наповнювача. У композиційних матеріалах, у яких механічні характеристики наповнювача і матриці менше відрізняються, наприклад для системи N–SiC (рис. 3), концентрація напружень знижується зі збереженням характеру її зміни від вмісту зміцнювальної фази. Розрахунки з визначення концентрації напружень виконували за формулою [7]. Вихідними даними для розрахунку були: для Ni матриці – модуль пружності $E_m = 1,86 \cdot 10^5$ МПа, модуль зсуву $G_m = 0,72 \cdot 10^5$ МПа, $G_m = 0,72 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуасона $\nu_m = 0,3$; TiB₂ – $E_f = 5,1 \cdot 10^5$ МПа, $G_m = 2,3 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_m = 0,1$; SiC – $E_f = 3,94 \cdot 10^5$ МПа, $G_m = 1,8 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_m = 0,1$.

$$K_{1r} = 2 \frac{G_f / G_m}{\eta + (1 + \xi) G_f / G_m} \left[1 + 4S \frac{\xi^2}{\pi^2} \left(3 + 7 \frac{\xi^2}{\pi^2} \right) \right], \quad (1)$$

де $S = \frac{G_f / G_m - 1}{G_f / G_m + 1}$; η і ξ – об'ємний вміст відповідно матриці і вкраплення.

Вираз (1) враховує як механічні характеристики компонентів, так і їх об'ємний вміст.

Залежності максимальної концентрації зсувних напружень K_{1r} від об'ємного вмісту вкраплення для композицій Ni–SiC та Ni–TiB₂ показано на рис. 3.

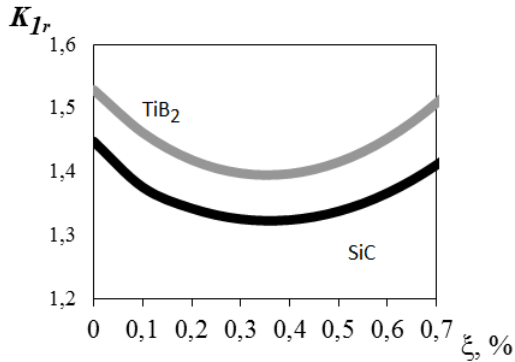


Рис. 3. Залежність концентрації напружень поздовжнього зсуву K_{Ir} від об'ємного вмісту TiB_2 і SiC

Наведені результати свідчать про те, що існує такий об'ємний вміст вкраплень (20...40 %), за якого існує мінімум інтенсивності локальних дотичних напружень матриці. Мінімальний знос також припадає на область композицій, що містять 20...40 % об'ємного вмісту SiC і TiB_2 . Поряд з іншими факторами це можна пояснити найнижчою концентрацією напружень.

Щодо оптимального розміру вкраплень (25...50 мкм) це, ймовірно, зумовлено навантаженням, яке вони сприймають. Навантаження на тверді вкраплення дорівнює фактичному контактному тиску, коли їх розміри менші або сумірні з розміром одиничної плями контакту (2...10 мкм). Навантаження менше на 2–3 порядки (дорівнює контурному) для вкраплень більших за 300 мкм, коли відношення площ одиничної плями контакту і площі твердого включення збігається з відносною площею дотикання [4]. Отже, тверді вкраплення розміром понад 300 мкм бажано використовувати для більш жорстких умов експлуатації, оскільки в цьому разі частка навантаження, що сприймається ними, більша. У перехідній області (10...300 мкм) слід очікувати, що величина навантаження на тверде вкраплення буде набувати деяких проміжних значень. Так, аналіз макро- і мікроструктур поверхонь тертя КЕП дозволяє стверджувати, що відносна поверхня дотикання композиції зменшується зі збільшенням розміру частинок наповнювача. Для композицій, що містить частинки розміром 5 мкм, менші від розмірів одиничних плям контакту, основний внесок у зносостійкість робить Ni матриця. На поверхні спостерігаються сліди захоплювання, пластичної деформації (рис. 4, а). На рис. 4, в, г показано поверхні тертя КЕП, що містить наповнювач розміром 100 мкм, коли відношення площ одиничної плями контакту і площі твердого вкраплення збігаються з відносною площею дотикання. На поверхні тертя наявні сліди абразивного зношування вільними частинками наповнювача, або закріпленими (шаржованими в поверхню контртіла). Для композицій з оптимальними розмірами частинок SiC (28 мкм) нехарактерні процеси захоплювання, абразивного і крихкого руйнування, тут відбувається нормальний механо-окиснювальний процес зношування (рис. 4, б).

Оскільки напружено-деформований стан залежить від структури покриття, цікаво дослідити вплив градієнта структури по глибині багатшарового покриття на його зносостійкість. Відомо, що задля підвищення зносостійкості деталей машин доцільно формувати на поверхні виробів із конструкційних матеріалів зносостійкі градієнтні нашарування, що мають гетерогенну структуру матрично-наповненого або скелетного типу [12].

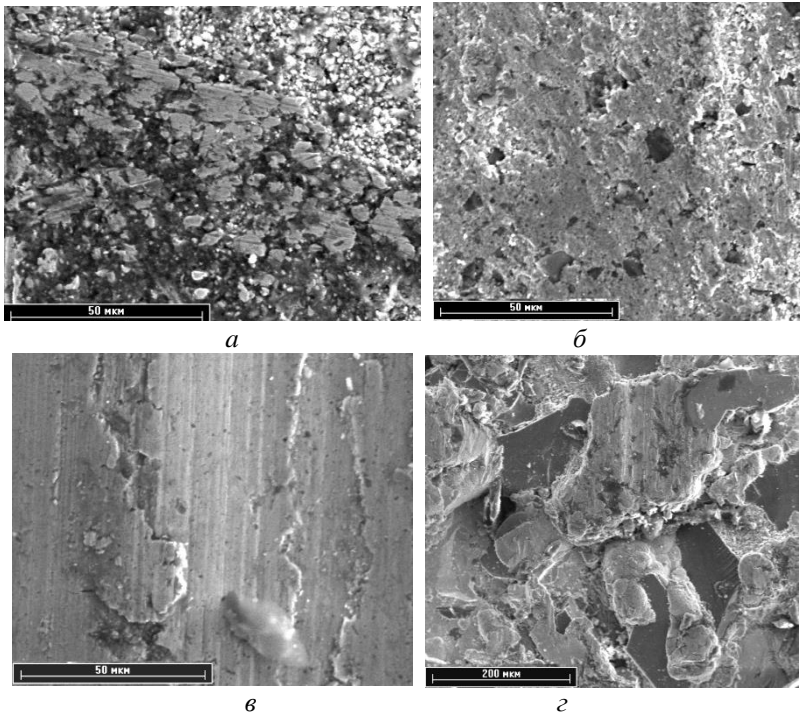


Рис. 5. Топографії поверхонь тертя КЕП:

a – Ni+SiC₅,×500; *б* – Ni+SiC₂₈,×500; *в* – Ni+SiC₁₀₀,×500; *г* –Ni+SiC₁₀₀,×100

Багатшарові градієнтні покриття отримували послідовним нанесенням шарів, що мали різні за розміром вкраплення. Досліджувались два варіанти розташування прошарків залежно від розмірів наповнювача:

від великих до дрібних вкраплень:

основа → 100/80 мкм → 28/20 мкм → 5/3 мкм → 50 нм;

від дрібних до великих:

основа → 5/3 мкм → 28/20 мкм → 100/80 мкм → 50 нм.

Триботехнічні дослідження багатшарових покриттів показали, що їх зносостійкість вища ніж одношарових (табл. 2).

Так, одношарові покриття з наночастинками характеризуються низькою зносостійкістю. Проте, якщо покриття з наночастинками наносилось на градієнтний підшар, то його зносостійкість на порядок підвищувалась. При цьому більшу зносостійкість мають покриття, порядок шарів у яких змінюється від великих до дрібних вкраплень. Це можна пояснити підвищенням дисипативних властивостей такого композиту, зумовлених схемою послідовності від основи розміщення шарів покриття в порядку зменшення пластичних і зростання пружних характеристик їх матеріалів [13]. Якщо застосувати градієнтне покриття як підшар для композиції з оптимальним розміром вкраплень, спостерігатиметься збільшення зносостійкості покриття у всьому діапазоні навантажень у разі розміщення шарів з вкрапленнями від великих до дрібних; дещо більший знос мають покриття з порядком розміщення від дрібних до великих.

Висновки. Дослідженнями визначено, що суттєвий вплив на зносостійкість КЕП має напружено-деформований стан матеріалу, навантаженого силами тертя. Величина напружень та їх розподіл в покритті визначає стійкість покриття проти спрацювання.

Таблиця 2

**Результати випробовувань на тертя та зношування покриттів
з наповнювачем різного розміру**

Тип наповнювача	Величина навантаження, Н	Коефіцієнт тертя	Ваговий знос зразка, мг/км	Лінійний знос пари тертя, мкм/км
SiC _{N50}	20	1,3	32,4	47
	40	0,8	33,9	48
	60	0,7	36,6	50
Великі→ дрібні→папо	20	1,15	3,8	40
	40	0,82	9,3	49
	60	0,75	6,2	38
Дрібні→ великі→папо	20	1,3	4,0	48
	40	0,91	9,8	55
	60	0,75	6,5	45
SiC ₂₈	20	1,1	2,7	11
	40	0,9	4,4	22
	60	0,73	9,0	30
Великі→ дрібні→28	20	1,52	1,8	16
	40	0,86	3,2	20
	60	0,84	2,1	27
Дрібні→ великі→28	20	1,36	2,5	18
	40	0,85	4,0	27
	60	0,82	7,8	29

Установлено, що оптимальний відносно зносостійкості об'ємний вміст зміцнювальної фази становить 25...40 %, що зумовлено співвідношеннями фізико-механічних властивостей наповнювача і матриці. Такий об'ємний вміст відповідає відношенню міжцентрової відстані частинок L до їх розміру d і становить $L/d \geq 3$. Це відношення зумовлює значне обмеження пластичної деформації і як наслідок – зміцнення матриці. Якщо $L/d < 3$, то внаслідок зменшення відстані між частинками ($\xi > 40$ %) відбувається значне локальне зміцнення матриці, що призводить до зниження міцності композиції через утворення тріщин на ослаблених межах розділу частинка – частинка. Якщо $L/d \gg 3$, зміцнення не суттєве, $\langle \sigma_1 \rangle / \langle \sigma_T \rangle_m$ наближується до одиниці.

Виявлено позитивний вплив градієнтного підшару на зносостійкість багатошарових покриттів, що зумовлено напружено-деформованим станом композиції, розподілом напружень, їх демпфірувальними властивостями, при цьому перевагу слід віддавати порядку розміщення шарів із вкрапленнями у підшарі від великих до дрібних. За такої будови зносостійкість покриття буде найвищою для таких умов тертя.

Список літератури

1. J. Paulo Davim. Wear of Composite Materials. – Berlin: De Gruyter. – 2018. – 140 p.
2. Колесниченко Л. Ф. Применение композиционных материалов в подвижных соединениях // Порошковая металлургия. – 1973. – № 9. – С. 27 – 33.
3. Корнієнко А. О., Федорчук С. В., Кіндрачук М. В. Триботехнічні дослідження при підвищених температурах композиційних покриттів з евтектичним наповнювачем. Проблеми тертя та зношування. – 2017. – №2 (75). – С. 66-71
4. Климанов Л. Ф. Разработка и исследование свойств композиционных материалов

для опор скольжения шарошечных долот: – Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. – К., 1980. – 199 с.

5. Киндрачук М. В., Лучка М. В. Износостойкость композиционных электрических покрытий на основе диборида титана в зависимости от температуры // Исследования в области новых материалов. – К.: ОНТИ ИПМ АН УССР. – 1977. – №3. – КИИГА – С. 98 – 102.

6. Васильченко И. П., Тихонович В. И., Ковальский А. В. К исследованию концентрации напряжений на шероховатых поверхностях поляризационно-оптическим методом // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1977. – С. 896 – 899.

7. Киндрачук М. В., Душек Я. В., Лучка М. В. Локальный характер напряженно-деформированного состояния композиционных материалов, нагруженного силами трения // Порошковая металлургия. – 1994. – № 9/10. – С. 56 – 61.

8. Эволюция структуры и свойств эвтектических покрытий при трении / М. В. Киндрачук, Ю. Я. Душек, М. В. Лучка, В. Н. Гладченко // Порошковая металлургия. – 1995. – №5/6. – С. 104 – 110.

9. Роль строения и свойств переходной зоны “матрица-наполнитель” в напряженном состоянии композиционных материалов триботехнического назначения / М. В. Лучка, Ю. Я. Душек, М. В. Киндрачук, А. А. Уськова // Порошковая металлургия. – 1998. – С. 86 – 93.

10. Лучка М. В. Покрыття градієнтного типу поверхні трибоконтакту ковзанням. – К.: ІПМ НАН України 1998. – 53 с. (Препринт № 98 –8)

11. Ковальський А. В., Тихонович В. И. Моделирование напряженного состояния композиционного материала, нагруженного силами трения // Проблемы трения и изнашивания. – 1985. – № 127. – С. 85 – 87.

12. Лучка М. В., Киндрачук М. В., Мельник П. И. Износостойкие диффузионно-легированные композиционные покрытия. – К.: Техніка, 1993. – 143 с.

13. Яковлев А. П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. – К.: Наук. думка, 1985. – 248 с.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2020.

Киндрачук Мирослав Васильович – член-кореспондент НАН України, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства, стандартизації та сертифікації Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара ,1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, mail: nau12@ukr.net.

Корнієнко Анатолій Олександрович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри машинознавства стандартизації та сертифікації Національного авіаційного університету.

Федорчук Світлана Володимирівна – старший викладач кафедри машинознавства, стандартизації та сертифікації, Національний авіаційний університет.

Рибасова Наталка Олександрівна – асистент кафедри прикладної інформатики Національного авіаційного університету.

Гловин Андрій Леонідович – старший викладач кафедри загальної інженерної підготовки, ВП НУБІПУ «Бережанський агротехнічний інститут», вул. Академічна, 20, м. Бережани, Україна, 47501, тел. 0974766893.

M. V. KINDRACHUK, A. O. KORNIENKO, S. V. FEDORCHUK, N. O. RIBASOVA, M. A. GLOVIN

INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE, STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF COMPOSITE COATINGS WITH DIFFERENT FILLER SIZE

The study of the stress-strain state of composite coatings with different filler sizes loaded by friction forces is carried out. It is shown that the stress distribution and their values have a significant effect on coatings wear resistance. The optimum volume content of 25 ... 40% of the hardening phase is established for maximum wear resistance. This is due to the ratio of physical and mechanical properties of the filler and the matrix. Studies of composite coatings containing several layers with different content and size of filler have also been conducted. It has been established that the creation of multilayer compositions has a positive effect on the wear resistance of such coatings.

Key words: composite coatings, multilayer compositions, stress, friction, wear.

References

1. J. Paulo Davim. *Wear of Composite Materials*. – Berlin: De Gruyter. – 2018. – 140 p.
2. Kolesnichenko L. F. *Primenenie kompozicionnyh materialov v podviznyh sochlenenijah // Poroshkovaja metallurgija*. – 1973. – № 9. – S. 27 – 33.
3. Korniienko A. O., Fedorchuk C. V., Kindrachuk M. V. *Trybotekhnichni doslidzhennia pry pidvyshchennykh temperaturakh kompozytsiinykh pokryttiv z evtektichnym napovniuvachem. Problemy tertia ta znoshuvannia*. – 2017. – №2 (75). – S. 66-71.
4. Klimanov L. F. *Razrabotka i issledovanie svojstv kompozicionnyh materialov dlja opor skol'zhenija sharoshechnyh dolot*: – Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.04. – K., 1980. – 199 s.
5. Kindrachuk M. V., Luchka M. V. *Iznosostojkost' kompozicionnyh jelektricheskikh pokrytij na osnove diborida titana v zavisimosti ot temperatury // Issledovanija v oblasti novykh materialov*. – K.: ONTI IPM AN USSR. – 1977. – №3. – KIIGA – S. 98 – 102.
6. Vasil'chenko I. P., Tihonovich V. I., Koval'skij A. V. *K issledovaniju koncen-tracii naprjazhenij na sheroho-vatyh poverhnostjakh poljarizacionno-opticheskim meto-dom // Dokl. AN USSR. Ser. A*. – 1977. – S. 896 – 899.
7. Kindrachuk M. V., Dushek Ja. V., Luchka M. V. *Lokal'nyj harakter naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija kompozicionnogo materialov, nagruzhennogo silami trenija // Poroshkovaja metallurgija*. – 1994. – № 9/10. – S. 56 – 61.
8. *Jevoljucija struktury i svojstv jevtekticheskikh pokrytij pri trenii / M. V. Kindrachuk, Ju. Ja. Dushek, M. V. Luchka, V. N. Gladchenko // Poroshkovaja metallurgija*. – 1995. – №5/6. – S. 104 – 110.
9. *Rol' stroenija i svojstv perehodnoj zony "matrica-napolnitel" v naprjazhen-nom sostojanii kompozicionnyh materialov tribotekhnicheskogo naznachenija / M. V. Luchka, Ju. Ja. Dushek, M. V. Kindrachuk, A. A. Us'kova // Poroshkovaja metallurgija*. – 1998. – S. 86 – 93.
10. Luchka M. V. *Pokryttia hradiientnogo typu poverkhni trybokontaktu kovzanniam*. – K.: IPM NAN Ukrainy 1998. – 53 s. (Preprynt № 98 –8)
11. Koval'skij A. V., Tihonovich V. I. *Modelirovanie naprjazhennogo sostojanija kompozicionnogo materiala, nagruzhennogo silami trenija // Problemy trenija i izna-shivannija*. – 1985. – № 127. – S. 85 – 87.
12. Luchka M. V., Kindrachuk M. V., Mel'nik P. I. *Iznosostojkie diffuzionno-legirovannye kompozicionnye pokryttija*. – K.: Tehnika, 1993. – 143 s.
13. Jakovlev A. P. *Dissipativnye svojstva neodnorodnyh materialov i sistem*. – K.: Nauk. dumka, 1985. – 248 s.